

고정자 권선 점적율을 극대화 하는 새로운 코일구조와 환형동선 코일구조간의 AC Resistance(R_{ac}) 비교

이의천*, 김용훈*, 이강원*, 이수웅*, 권순오*
한국생산기술연구원(KITECH)*

AC Resistance(R_{ac}) comparison between the new type of coil structure and the annular copper coil to maximize the conductor occupying ratio

Eui-Chun LEE¹, Yong-Hoon Kim¹, Kang-Won LEE¹, Su-Woong Lee¹ and Soon-O Kwon¹
KITECH(Korea Institute of Industrial Technology)¹

Abstract - This paper proposes a new structure of coil to maximize the conductor occupying ratio(conductor cross sectional area than the cross sectional area inside the slot) of the magnetic core. Further, assuming a case in which the 3-D coil is applied to a real motor. Analyze the current density distribution of the coil conductor by electromagnetic analysis method. Finally the AC resistance was measured according to the frequency of the coils. This experiment is to calculate a optimal operating frequency to obtain high efficiency operational frequency range of motor.

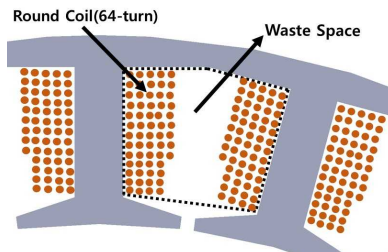
1. 서 론

현대 사회에서 전동기와 발전기는 내연기관과 더불어 거의 모든 산업의 기본적인 동력원이 되고 있다. 특히 전동기 또는 발전기의 효율을 향상 시키는 문제는 에너지 소비율 및 경제성에 직결되는 문제이기 때문에 연구가 활발히 진행 되고 있다. 이번 논문에서는 마그네틱 코어 내부의 점적율(슬롯 내부 단면적 대비 도체단면적)을 극대화 하는 새로운 코일구조를 제안하였다. 또한 이 코일이 실제 모터에 적용된 경우를 가정하여 전자기 해석기법으로 도체 내의 전류밀도 분포를 분석 하였다. 최종적으로는 모터가 최적의 효율을 가지는 작동 주파수를 산출하기 위해 실제 코일을 제작하여 각 코일의 주파수에 따른 저항을 측정하였다.

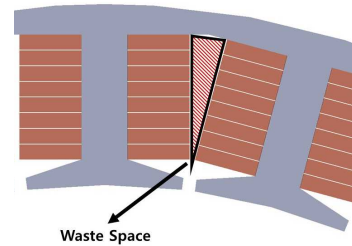
2. 본 론

2.1 마그네틱 코어 슬롯 내부의 공간낭비

일반적인 경우 환형동선을 슬롯내부에 권선하여 전동기 또는 발전기를 제작하는 경우가 많다. 하지만 이 경우 Fig. 1에서 나타낸 바와 같이 환형동선이 원형이기 때문에 각 동선의 원주에 의해 동선들 사이에 빈공간이 생기는 문제가 있다. 이러한 문제를 보완 할 수 있는 평각코일의 경우에도 <그림 2>에서 나타낸 바와 같이 모터내부 중심에서 외경으로 갈수록 원주 때문에 슬롯내부에 삼각형 형태의 빈공간이 발생하는 단점이 있다. 특히 환형동선을 권선한 모터의 슬롯 내부의 공간 낭비가 심해서 일반적인 상용 모터의 경우 점적율이 30~40% 대에 머물고 있는 실정이다. 환형동선을 권선하는 작업 자체도 권선기를 이용하여 작업자가 권선해야 하므로 시간과 노력이 많이 드는 단점이 있다.



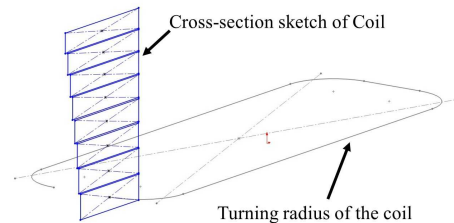
<그림 1> Round coil and waste space



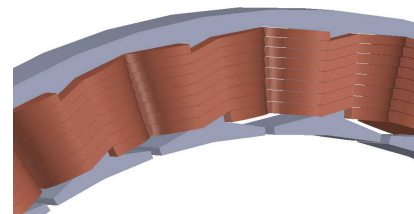
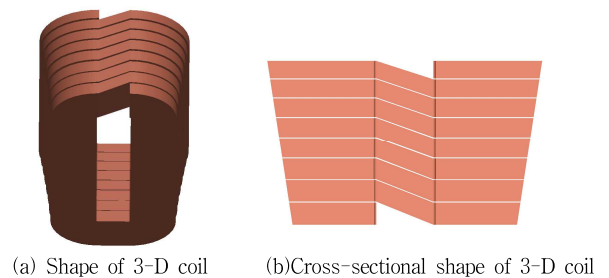
<그림 2> Rectangular coil and waste space

2.2 점적율을 극대화 하는 구조의 3-D 코일 설계

코일의 각 턴당 도체 저항을 동일하게 만들기 위해 코일의 단면적은 유지하되 단면형상을 각 코일의 턴마다 변화시켜 설계 하였다. 기존에 설계된 환형동선을 적용한 모터의 경우 각 슬롯당 64턴으로 설계되어있다. 동일 코어구조에 적용되는 점적율을 극대화 하는 코일구조의 경우는 옴의 법칙에 의거하여 코일 8개를 직렬로 연결하는 모터회로 구조의 변경을 필요로 한다.



<그림 3> Design sketch of 3-D coil



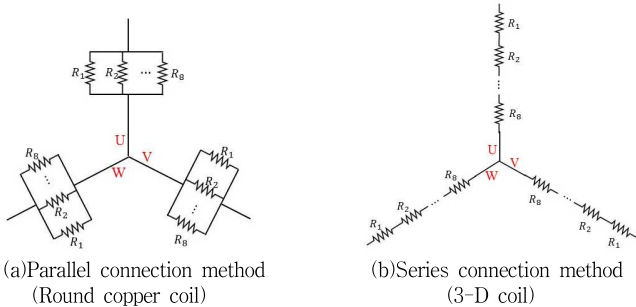
<그림 4> Shape of 3-D coil

2.2.1 환형, 평각, 점적율은 극대화 하는 코일구조의 점적율 비교

점적율을 극대화한 특수 코일의 경우 점적율은 82.8%이다. 기존 환형동선을 을 권선한 모터와 비교하면45% 향상되었으며 평각코일을 적용한 경우에 비해16.5% 향상되었다.

2.2.2 새로운 회로 구조로의 변경

기존 설계된 환형동선을 적용한 모터의 경우 각 슬롯 당 64턴으로 설계하였다. 동일 코어구조에 적용되는 점적율을 극대화 하는 코일구조의 경우는 옴의 법칙에 의거하여 코일 8개를 직렬로 연결하는 모터회로 구조의 변경을 필요로 한다.



〈그림 4〉 Circuits for each coil's connection method

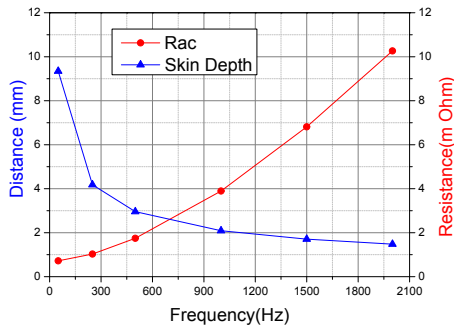
2.3 점적율을 극대화 하는 코일 구조의 전자기 해석

2.3.1 AC 전류가 흐르는 도체의 성질

AC 전류를 사용하는 경우 도선 도체의 중심에 가까울수록 자속쇄교수(Flux linkage)가 커서 전류밀도가 작고 가장자리는 전류밀도가 상대적으로 커지며 이러한 현상은 표피효과와 근접효과로 정의 된다. 이 현상이 심해질수록 도체 저항이 증가하므로 코일의 Copper loss 값이 증가하고 결과적으로 모터의 효율을 저하시킨다. 표피효과와 근접효과와 영향을 Skin depth(σ)로 정의 하며 식으로 정리하면 다음과 같다. (ρ = Resistivity, μ = Permeability f = Frequency)

$$\sigma = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} = \sqrt{\frac{\rho}{\Pi f\mu}} \quad (1)$$

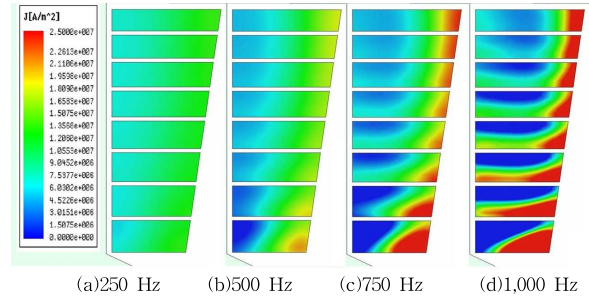
정의된 Skin depth(σ)가 도체 내에서 거리(Distance)와 저항(Resistance)에 따라 어떤 변화를 보이는지 그림 5를 통해 나타내었다



〈그림 5〉 Skin depth and R_{ac} according to frequency

2.3.3 점적율을 극대화 하는 코일 구조의 전자기 해석을 통한 전류밀도 분석

도체 단면적이 극대화된 코일의 경우 주파수가 증가하면서 skin effect와 proximity effect의 영향이 커진다. 따라서 상대적으로 중-저주파수 대역에서의 우수한 효율특성을 예상할 수 있다. 일반적인 경우 이러한 현상들은 단면적이 넓을수록, 또는 주파수가 높을수록 비교적 전류가 도체의 가장자리로 몰리는 특성이 있다. 본 해석은 도체내부의 전류 밀도 변화가 점적율을 극대화한 코일에 어떻게 적용 되는지 분석하기 위한 과정이다. 그림 5 에 나타낸 바와 같이 주파수에 따른 코일의 전자기적 특성을 확인 하였다.



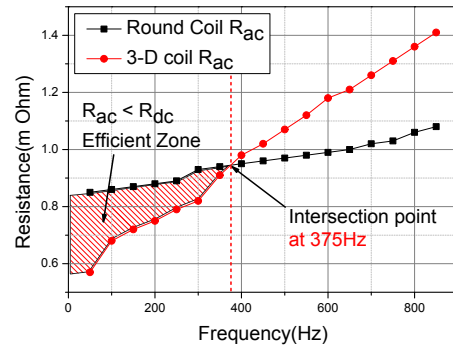
〈그림 5〉 Changes in current density of the 3D-coil's cross-sectional area according to frequency changes

2.4 환형동선과 점적율을 극대화 하는 코일구조의 주파수에 따른 저항 측정 실험

AC전류 조건인 경우 그림 5 에서 확인한 바와 같이 주파수가 증가할수록 상대적으로 도체 내부의 전류밀도 몰림 현상이 심해지고 이로 인해 실용도체면적은 감소한다. 이를 확인하기 위해 그림 6 의 LCR 미터를 사용하여 두 가지 코일의 주파수에 따른 저항을 측정 하였으며 측정 데이터를 그림 7 의 그래프에 나타내었다.



〈그림 6〉 Two types of coil and LCR meter



〈그림 7〉 Round coil and 3-D coil R_{ac} comparison

3. 결 론

본 논문에서는 마그네틱 코어 슬롯내부의 공간을 최대한 도체로 채워 넣어 상대적으로 낮은 전기저항을 가지는 코일구조를 제안한다. 하지만 이러한 코일을 AC전동기 및 발전기에 사용할 경우 전자기적인 특성으로 인해 주파수가 증가할수록 저항이 증가한다. 이러한 내용은 실험을 통해 두 코일(Round, 3-D) 모두 주파수가 증가하면 AC저항(R_{ac})이 증가하는 것을 확인 할 수 있었다. 특히 중-저속에서 작동하는 대형발전기 및 전기 자동차용 전동기에 본 코일을 적용할 경우 설계에 따라 상당한 에너지 효율개선이 있을 것으로 예상된다. 또한 점적율을 극대화하는 코일은 코일자체가 단일 형상으로 모터 제작의 공정 간소화에도 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

〈참 고 문 헌〉

[1] Yong-Hoon Kim, A Study on Core loss and AC Resistance considering Current Harmonics and Magnetic Saturation Effect, Master degree of science, Department of automotive Engineering, Han-Yang University, Korea. 2012.6
 [2] Eui-Chun LEE, Magnetic Core Structure Design Considering Conductor Occupying Ratio, EVS28 KINTEX, Korea, May 3-6, 2015
 [3] J.R. Hendershot & T.J.E. Miller, design of brushless permanent-magnet machines, 822pages, ISBN-10: 0984068708, Motor Design Books LLC Second Edition, March 30, 2010